

Perda de carga em escoamentos laminares de fluidos pseudoplásticos através de uma curva de 90°

Rigatto, S. F.^{1*}, Siqueira, R. N.²

¹Aluna do Programa de Pós-Graduação em Energia, Universidade Federal do Espírito Santo – UFES, campus São Mateus, ES

²Professor do Instituto Federal do Espírito Santo – IFES, campus São Mateus, ES

*Autor para correspondência, E-mail: suellenrigatto@gmail.com

Resumo: Dentre as substâncias não newtonianas utilizadas na indústria e que são transportadas por redes de tubulações, uma das que possui uma maior gama de aplicações é a goma xantana, que apresenta características pseudoplásticas. Devido à escassez de trabalhos na literatura, existe um grande interesse em entender a perda de carga em escoamentos de fluidos pseudoplásticos através de curvas. O escoamento nestas configurações é fortemente influenciado pelo número de Dean, que define a dinâmica do escoamento através de curvas. Neste trabalho, a análise de perda de carga é realizada numericamente através do *software Ansys CFX 16.0*. O escoamento, através da curva de 90°, é laminar e o fluido é uma solução aquosa de goma xantana, representado pelo modelo reológico de *Power-Law*. Através dos resultados é possível concluir que o aumento da perda de carga em uma curva está diretamente ligado ao aumento do número de Dean.

Palavras chave: goma xantana, modelo de *Power-Law*, curva de 90°, perda de carga.

1. Introdução

A presença de curvas em sistemas de tubulações pode ser observada com frequência em projetos de engenharia. Acessórios instalados em tubulações resultam no fenômeno de perda de carga, também chamado de redução de pressão, que ocorre em qualquer tipo de escoamento, independente das condições e características do mesmo.

Dentre os fluidos não newtonianos utilizados na indústria e que são transportadas por redes de tubulações, destaca-se a goma xantana. São numerosas as áreas de aplicação da goma xantana, desde aplicações na indústria de alimentos a fluidos utilizados no processo de perfuração e limpeza de poços de petróleo (Katzbauer, 1998).

As propriedades lubrificantes, a capacidade de reduzir o atrito no poço de petróleo, a alta viscosidade das soluções e a solubilidade em água criaram aplicações importantes para a goma xantana na indústria do petróleo, onde é comumente usado em fluidos de perfuração e em processos de recuperação de óleo traçado (Garcia-Ochoa *et al.*, 2000). A solução aquosa de goma xantana possui um comportamento de fluido *Power-Law* (Katzbauer, 1998).

Os fluidos pseudoplásticos, representados pelo modelo reológico de *Power-Law*, também são conhecidos como fluidos de *Ostwald de Waele* (Chhabra E Richardson, 2008). A Eq. (1) representa esse modelo.

$$\mu_e(\dot{\gamma}) = k\dot{\gamma}^{n-1}, \quad (1)$$

onde, μ_e é a viscosidade efetiva, $\dot{\gamma}$ é a taxa de deformação, k é o índice de consistência e n é o índice de *Power-Law*, também conhecido como índice de comportamento.

Devido à escassez de trabalhos que avaliam o escoamento pseudoplástico em curvas, é de extrema importância o desenvolvimento de estudos que avaliam perda de carga para fluidos não newtonianos, no intuito de melhor entender esse fenômeno.

As equações que regem os escoamentos de fluidos são a equação da continuidade, Eq. (2), e a equação de *Navier-Stokes* para escoamento incompressível com viscosidade efetiva, μ_e , variando com a taxa de deformação, Eq. (3).

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{V} = 0, \quad (2)$$

$$\frac{D\vec{V}}{Dt} = -\vec{\nabla}P + \rho\vec{g} + \mu_e\nabla^2\vec{V}, \quad (3)$$

onde \vec{V} é o vetor velocidade, ρ é a massa específica do fluido, t representa o tempo, P a pressão do fluido e \vec{g} representa a aceleração da gravidade.

Para qualquer fluido, um dos fatores que determina a natureza do escoamento é a relação entre forças viscosas e inerciais, determinada pelo número de Reynolds, Re (Pereira, 2006). Para fluidos do tipo *Power-Law*, é usado o número de Reynolds generalizado, Re_{MR} . Em seu trabalho, Pereira (2006) define o número de Reynolds generalizado para fluidos do tipo *Power-Law* de acordo com a Eq. (4), onde, v representa a velocidade de fluido e D é o diâmetro do tubo.

$$Re_{MR} = \frac{\rho v^{(n-2)} D^n}{k}. \quad (4)$$

O cálculo de perda de carga é essencial quando se faz necessário projetar tubulações e especificar bombas, pois permite conhecer a potência que deve ser requerida pelo projeto para um correto dimensionamento de um sistema de bombeio de uma rede de tubulação. As perdas de cargas ao longo de um escoamento podem ser classificadas em perdas distribuídas ou localizadas. As perdas distribuídas são causadas pelo atrito do fluido com as paredes do duto, enquanto que as perdas localizadas são causadas por acessórios presentes ao longo do escoamento. A perda de carga pode ser avaliada experimentalmente ou através de estudos numéricos.

A queda de pressão total na geometria estudada, ΔP_{total} , e a queda de pressão que ocorre na presença de um tubo com curva de 90° , ΔP_{tc} , são mostradas, respectivamente, pelas Eq. (5) e (6).

$$\Delta P_{total} = P_{entra} - P_{sai}, \quad (5)$$

$$\Delta P_{tc} = \Delta P_{total} - (L_{total}) \frac{\lambda \rho \bar{v}^2}{D}, \quad (6)$$

onde, P_{entra} é a pressão na entrada da geometria, P_{sai} é a pressão na saída da geometria, L_{total} representa o comprimento total da tubulação, λ representa o coeficiente de perda de carga de *Darcy-Weisbach* e \bar{v} é a velocidade média.

O coeficiente de perda de pressão, ε , em uma curva é representado pela Eq. (7).

$$\varepsilon = \frac{\Delta P_{tc}}{\rho \bar{v}^2 / 2}. \quad (7)$$

As forças centrífugas que ocorrem em curvas são responsáveis por produzir um escoamento secundário que assume a forma de duplo vórtice, causando um movimento transversal do fluido e modificando as condições hidrodinâmicas do escoamento (Pelissari, 2006).

Segundo Pelissari (2006), a ocorrência dos vórtices se deve à diferença do momento axial entre as partículas do fluido da região central e da região próxima à parede, resultante das constantes mudanças de direção, uma vez que o fluido da região central sofre força centrífuga maior que o fluido próximo à parede.

Dean (1928) foi um dos autores que avaliaram o escoamento em curvas. O mesmo concluiu que esse tipo de escoamento apresenta instabilidades devido ao aparecimento de pequenas perturbações no escoamento causadas pelo efeito da curvatura.

A avaliação da dinâmica do escoamento através de curva é definida, primordialmente, pelo número de Dean, que representa a relação entre o raio de curvatura, R_c , o número de Reynolds, Re , e o diâmetro da tubulação, D . A Eq. (8) define o número de Dean, De .

$$De = Re \sqrt{\frac{D/2}{R_c}}. \quad (8)$$

Marn e Ternik (2006) avaliaram, numericamente, a perda de carga de um escoamento laminar de um fluido não newtoniano com comportamento *shear-thickening* (dilatante) em uma curva de 90° . Os autores empregaram o modelo de *Power-Law* para avaliar o comportamento do escoamento para diferentes valores

de Reynolds, variando de 500 a 1500. Marn e Ternik (2006) também apresentaram correlações empíricas para representar a perda de carga na curva analisada para o modelo de *Power-Law*, de acordo com a Eq. (9).

$$\varepsilon = K_1 Re^{K_2}, \quad (9)$$

onde K_1 e K_2 são, respectivamente, 1,6518 e 0,050834 para fluidos dilatantes.

2. Metodologia

O presente trabalho analisa numericamente, através do software *Ansys CFX 16.0*, o escoamento de um fluido pseudoplástico em uma curva de 90° e se baseia no estudo de Marn e Ternik (2006), que avaliaram a perda de carga de um escoamento com fluido dilatante em uma curva de 90° utilizando o software *Ansys CFX-4.4*.

A geometria utilizada nas simulações possui como parâmetros $D = 0,0127$ m, $R_c = D$, $L_u = 0,5$ m e $L_d = 2,5$ m. A geometria é apresentada na Fig.1.

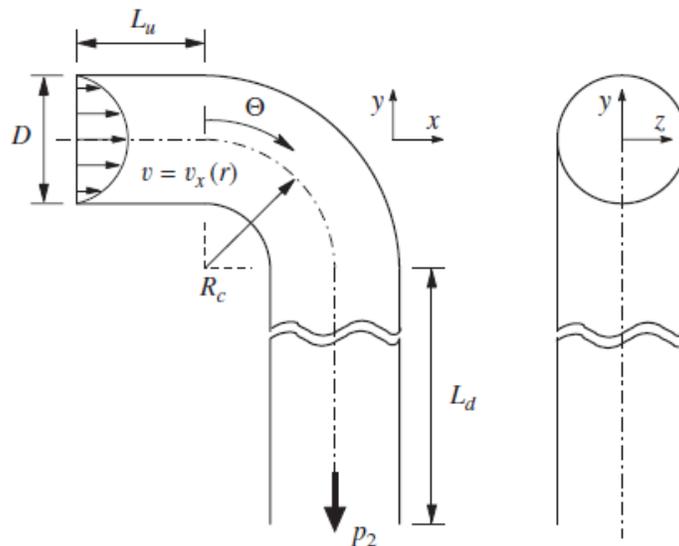


Figura. 1. Geometria utilizada para a análise do escoamento. Fonte: Marn e Ternik (2006).

O fluido utilizado foi escolhido a partir do trabalho de Vieira Neto *et al.* (2014), que analisou uma solução aquosa de goma xantana. A massa específica, ρ , foi adotada como sendo a mesma massa específica da água, 998 (kg/m^3), partindo do pressuposto que a concentração de goma xantana é baixa o suficiente para não promover mudanças na massa específica da mistura.

A solução aquosa de goma xantana é um fluido não newtoniano com características fortemente pseudoplásticas (Katzbauer, 1998), podendo ser avaliada pelo modelo de *Power-Law*. Os parâmetros reológicos utilizados neste estudo são $k = 0,678$ Pa.s e $n = 0,7$. O valor do índice de comportamento foi adotado com base no trabalho de Gabriel e Siqueira (2015), que estudaram, numericamente, a influência da variação do índice de comportamento no escoamento de uma solução aquosa de goma xantana. Gabriel e Siqueira (2015) concluíram que para valores de índice de comportamento $n > 0,5$ a perda de carga aumenta consideravelmente. Esse comportamento se deve ao fato da perda de carga ser diretamente proporcional à viscosidade do fluido.

Para a solução do problema analisado foram adotadas as seguintes hipóteses: escoamento permanente, laminar e isotérmico, fluido incompressível e regime de não deslizamento na parede.

A velocidade axial de entrada em cada caso foi determinada para valores de De variando de 353,55 a 1060,70.

O método de discretização utilizado na simulação do escoamento com fluido pseudoplástico foi o método *upwind*.

A partir de um teste de malha foi escolhida uma malha com aproximadamente 4,87 milhões de elementos. Neste grau de refinamento os resultados se tornam independentes da malha, tal que somente parâmetros físicos influenciem no fenômeno.

3. Resultados e discussões

3.1. Análise do escoamento do fluido pseudoplástico através da curva de 90°

Os contornos de velocidade na saída da curva para cada número de Dean são apresentados na Fig. 2. Devido à simetria, são apresentados contornos e campos de velocidade de metade da seção transversal da tubulação. Nas Fig. 2 e 3, E representa a parede externa e I representa a parede interna.

Através da Fig. 2 é possível observar o aumento da velocidade na parede externa à medida que se aumenta o número de Dean. Esse fenômeno causa, no elemento de fluido, movimentos helicoidais (Austin, 1973 e Gnielinski, 1986 *apud* Pelissari, 2006).

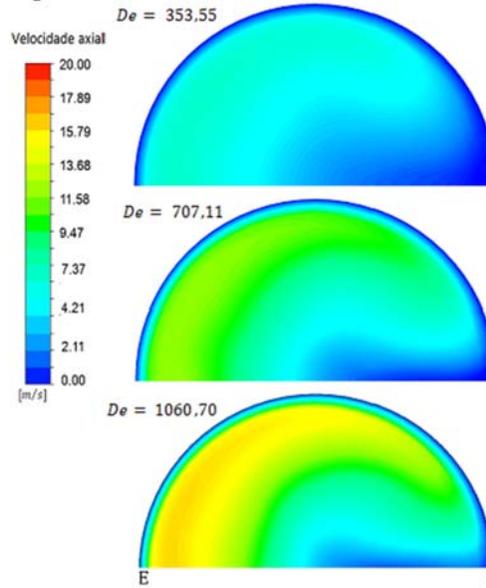


Figura 2. Contornos de velocidade axial na posição de 90° (saída da curva).

Os campos de velocidade secundária na saída da curva para os valores de Dean são mostrados na Fig. 3. Os vórtices são formados devido aos movimentos helicoidais do fluido associado ao aumento do valor de Dean.

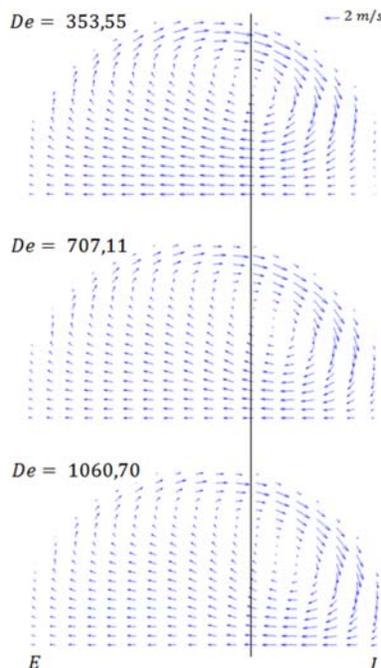


Figura 3. Campo de velocidade secundária na posição 90° (saída da curva).

Com o aumento do número de Dean, o vórtice formado no escoamento tende a se deslocar cada vez mais para uma posição mais próxima à parede interna. Esse fenômeno ocorre devido ao gradiente de pressão induzido através de forças centrífugas presentes na saída da curva.

Padrões de velocidades secundárias similares foram encontrados nos trabalhos de Van de Vosse *et al.* (1989) que analisa o escoamento de fluidos newtonianos, e de Gijsen *et al.* (1999) que avalia o escoamento de fluido não newtoniano. Em ambos os trabalhos, podem ser encontrados a presença de vórtices de Dean.

3.2. Avaliação da perda de carga no escoamento do fluido pseudoplástico

A queda de pressão que ocorre na presença de um tubo com curva de 90°, ΔP_{tc} , avaliadas pela Eq. (6), é apresentada na Fig. 4. A queda de pressão aumenta linearmente com o aumento do número de Dean, De , como observado na Fig. 4.

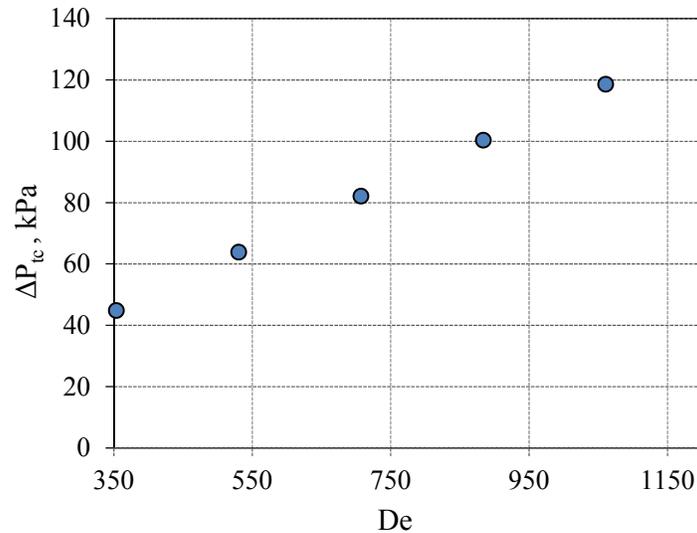


Figura 4. Queda de pressão ΔP_{tc} para os valores do número de Dean analisados.

O coeficiente de perda de carga, ε , calculado pela Eq. (7) é apresentado na Fig. 5. Apesar de a literatura normalmente apresentar a perda de carga em função do número de Reynolds, por se tratar de uma geometria com curvatura, sabe-se que o número de Dean possui maior influência nesse tipo de escoamento do que o próprio número de Reynolds. Diante disso, o presente estudo propõe uma relação empírica relacionando os coeficientes de perda de carga para fluidos pseudoplásticos com o número de Dean.

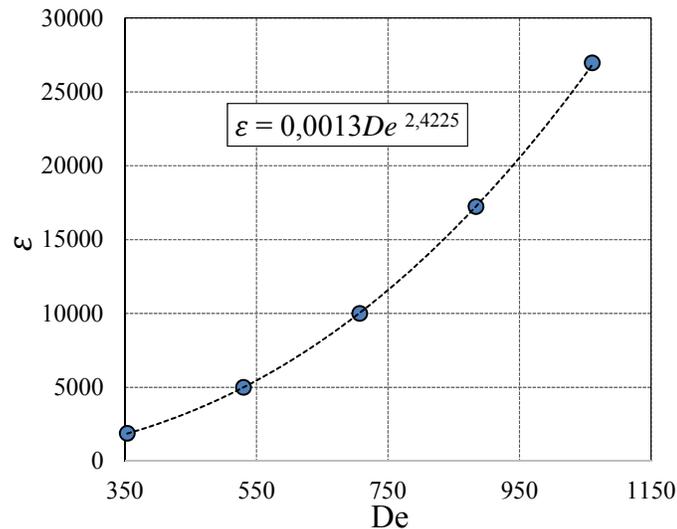


Figura 5. Coeficiente de perda de carga versus número de Dean para a Eq. (8).

Através do método dos mínimos quadrados, representado pela linha pontilhada, encontra-se que os valores para K_1 e K_2 , que representam os coeficientes de perda de carga para fluidos pseudoplásticos, são, respectivamente, 0,0013 e 2,4225. Essa correlação é apresentada na Eq. (10) e mostrada na Fig. 5. O coeficiente de determinação para o ajuste realizado foi $R^2 = 1$.

$$\varepsilon = K_1 De^{K_2} \quad (10)$$

A Eq. (9) é bastante semelhante com a Eq. (10), diferenciando apenas pelo fato de a Eq. (10) correlacionar os coeficientes de perda de carga, K_1 e K_2 , com o número de Dean, enquanto que a Eq. (9) os correlaciona com o número de Reynolds. Apesar de serem desenvolvidas para comportamentos reológicos diferentes, a queda de pressão, ΔP_{tc} , varia linearmente tanto no presente trabalho quanto no estudo realizado por Marn e Ternik (2006). O mesmo ocorre para o coeficiente de perda de carga, que varia segundo a lei de potência em ambos os casos. Esses resultados podem confirmar a acurácia da utilização da Eq. (10) no dimensionamento de um sistema de bombeio de uma rede de tubulação.

4. Considerações finais

Através do presente estudo foi possível analisar o escoamento de uma solução aquosa de goma xantana, que possui características pseudoplásticas, através de uma curva de 90° .

O aumento do número de Dean resulta em um deslocamento do vórtice formado em direção à parede interna da tubulação. Esse fenômeno ocorre devido ao gradiente de pressão induzido através de forças centrífugas presentes na saída da curva.

Por fim, foram encontrados os valores para K_1 e K_2 que representam o coeficiente de perda de carga para fluidos pseudoplásticos.

Para estudos futuros sugere-se avaliar, sob os mesmos parâmetros, o escoamento através de outros acessórios utilizando a solução de goma xantana. Além disso, sugere ser avaliado o escoamento de outros tipos de fluidos através de uma curva de 90° .

Agradecimentos

Os autores agradecem ao IFES, Instituto Federal do Espírito Santo, todo o apoio relativo às instalações e equipamentos.

Referências bibliográficas

Chhabra, R. P.; Richardson, J. F. *Non-Newtonian flow and applied rheology: engineering applications*. Butterworth-Heinemann, 2008.

Dean, W. R. *Fluid motion in a curved channel*. Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character, p. 402-420, 1928.

Gabriel, A. C.; Siqueira, R. N. Influência do Índice de Comportamento do Modelo Power-Law da Eficiência do Processo de Perfuração. In: Encontro Nacional de Hidráulica de Poços de Petróleo e Gás, Rio Quente, 2015.

Garcia-Ochoa, F.; Santos, V.; Casas, J. A.; Gómez, E. *Xanthan gum: production, recovery, and properties*. Biotechnology advances, v. 18, n. 7, p. 549-579, 2000.

Gijsen, F. J. H.; Allanic, E.; Van De Vosse, F.N.; Janssen, J.D. *The influence of the non-Newtonian properties of blood on the flow in large arteries: unsteady flow in a 90 curved tube*. Journal of biomechanics, v. 32, n. 7, p. 705-713, 1999.

Katzbauer, B. *Properties and applications of xanthan gum*. Polymer Degradation and Stability, v. 59, n. 1, p. 81-84, 1998.

Marn, J.; Ternik, P. *Laminar flow of a shear-thickening fluid in a 90° pipe bend*. Fluid dynamics research, v. 38, n. 5, p. 295-312, 2006.

Pelissari, L. M. T. Influência de Parâmetros de Projeto no Desempenho do Floculador Tubular Helicoidal Aplicado ao Tratamento de Água de Abastecimento. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2006.

Pereira, F. A. R. Escoamento laminar de líquidos não-newtonianos em seções anulares: estudos de CFD e abordagem experimental. 2006. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2006.

Van De Vosse, F. N.; Van Steenhoven, A. A.; Segal, A.; Janssen, J. D. *A finite element analysis of the steady laminar entrance flow in a 90 curved tube*. International journal for numerical methods in fluids, v. 9, n. 3, p. 275-287, 1989.

Vieira Neto, J. L.; Martins, A. L.; Ataíde, C. H.; Barrozo, M. A. S. *The effect of the inner cylinder rotation on the fluid dynamics of non-Newtonian fluids in concentric and eccentric annuli*. Brazilian Journal of Chemical Engineering, v. 31, n. 4, p. 829-838, 2014.